

第3章

Certified Wireless USB 対応機器の検証の勘どころ

無線特有のデータ解析方法とコンプライアンス・テストの概要

辻 嘉樹

Certified Wireless USB対応機器の検証に焦点を当てる．無線接続を利用したUSBプロトコル仕様でUSB-IF（Implementers Forum）によって定められたものを「Certified Wireless USB」と呼ぶ．ここでは，既存のUSB 2.0に対して大幅に変更された物理層について，データの構造や解析方法を中心に解説する．（編集部）

USB（universal serial bus）は，シリアル・インターフェースの中でもっとも普及しているといえます．近年，さらなる使い勝手の向上を目ざし，有線による配線の手間を省くため，無線方式を採用したUSBが考案されています．物理層に用いる無線方式には，米国Freescale Semiconductor社が提唱するDS-UWB（direct sequence-ultra wideband）方式[注1]を用いた「Cable-Free USB」や，WiMedia Alliance[注2]が定めるMB-OFDM（multiband-orthogonal frequency division modulation）方式のUWBを用いた「Certified Wireless USB」が知られています．ここでは後者を取り上げます．

1. Certified Wireless USBとは

Certified Wireless USB（以下，Wireless USBとする）の仕様は，2005年5月にUSB-IF（USB Implementers Forum）で承認されました．

2006年4月に東京で開催された「インテル・デベロッパー・フォーラム Japan 2006」では，USB-IFブースにおいて半導体メーカや計測器メーカがWireless USBのデモンストレーションを行いました．また，2006年の後半にはWireless USBのテスト仕様が公開され，相互接続性試験やロゴ認証などが開始されるでしょう．

図1は，米国Intel社が考えるWireless USBの運用形態を示した図です．この図を見ると，現行の有線のUSB接続（パソコンとプリンタや記憶メディアの接続，プリンタとディジタル・カメラの接続など）はもちろんですが，そのほかにもゲームやAV機器における利用に大きな期待を寄せていることがわかります．

● アイソクロナス転送に変更あり

すでに市場に存在する有線のUSBアプリケーションからの移行を最小限の工数で行えるように，MAC（media access control）層から上の階層ではほとんどそのまま既存のUSB

注1：伝送方式としてDS-SS（直接拡散方式）を用いたUWB技術．
注2：WiMedia Allianceは，MB-OFDMを用いたUWBの物理層とMAC層，および上位の通信プロトコルのインターフェースをとるための階層（コンバージェンス層）などの仕様を策定している業界団体．詳細は同団体のWebサイト（http://www.wimedia.org/）を参照．

KeyWord　DS-UWB，Cable-Free USB，WiMedia Alliance，MB-OFDM，Certified Wireless USB，Windows Vista，物理層，コンプライアンス・テスト

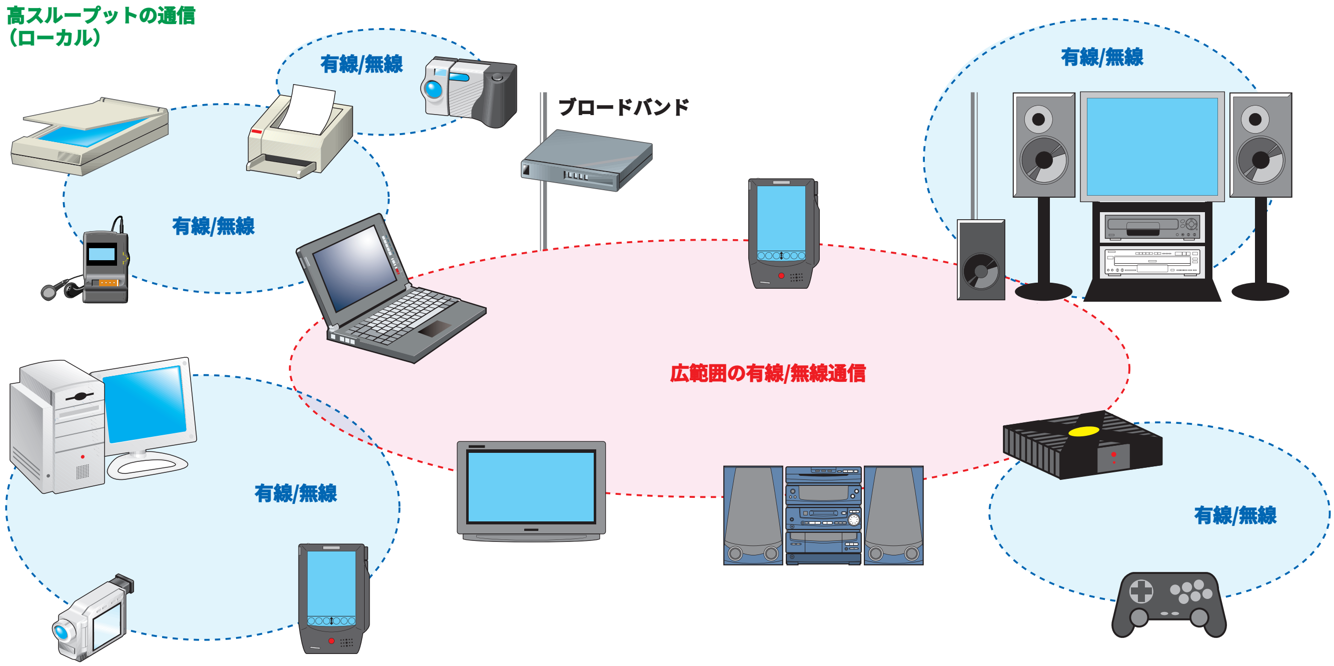


図1　Wireless USB の概念図(3)

この図では，既存のアプリケーションであるパソコンと周辺機器の接続やディジタル・カメラとプリンタの接続だけでなく，AV機器やゲーム機器を中心としたホーム･ネットワークの構築を強く意識したものとなっている．

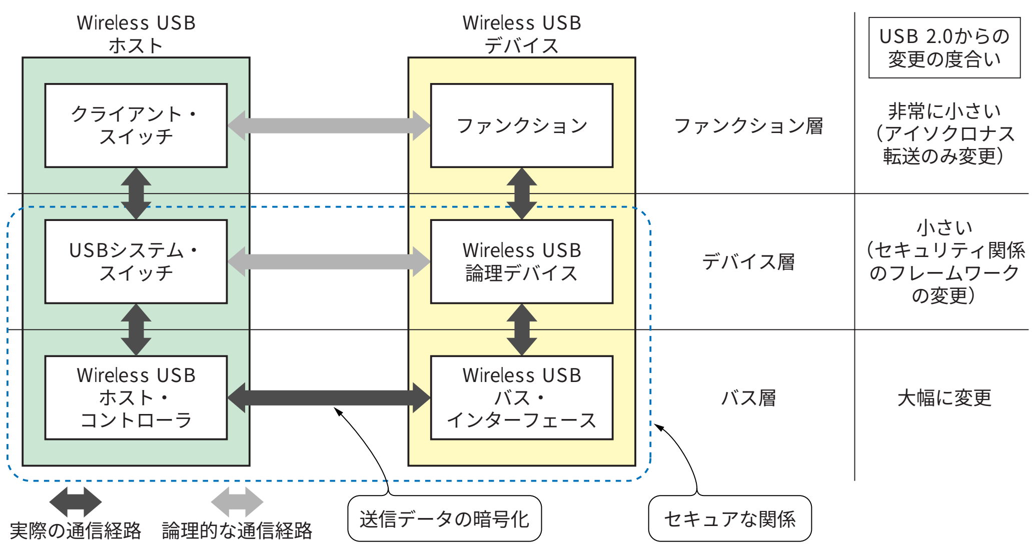


図2
Wireless USB の各階層におけるソフトウェアの変更(5)

Wireless USB では，既存のソフトウェア資産を有効に活用できるように，ファンクション層はほとんど変更する必要がない．また，デバイス層では無線通信に必要な暗号化などの情報保護機能の追加に限定される．一方，物理層では大幅な変更が必要となる．

プロトコル・スタックを使えるようになっています(図2)．物理層とそれに近い層では，大幅な変更が必要となりますが，それよりも上位層では変更を最小限にとどめています．ここで注目すべき点は，Wireless USB では映像配信における利用を見込んで，アイソクロナス転送注3の部分に変更(改良)が加えられていることです．既存の USB も映像配信を考慮してアイソクロナス転送に対応していますが，実際に利用しているケースは多くありません．

米国 Microsoft 社は OS「Windows Vista」の最初の製品では Wireless USB に対応しませんが，近い将来は図3のようなスタックを用意することを表明しています．また，

注3：オーディオやビデオなどのリアルタイム転送に用いられる転送方式．USB 2.0では，オーバヘッドを減らすためハンドシェーク PID(パケット ID)やリトライ機能は使用しない．

3

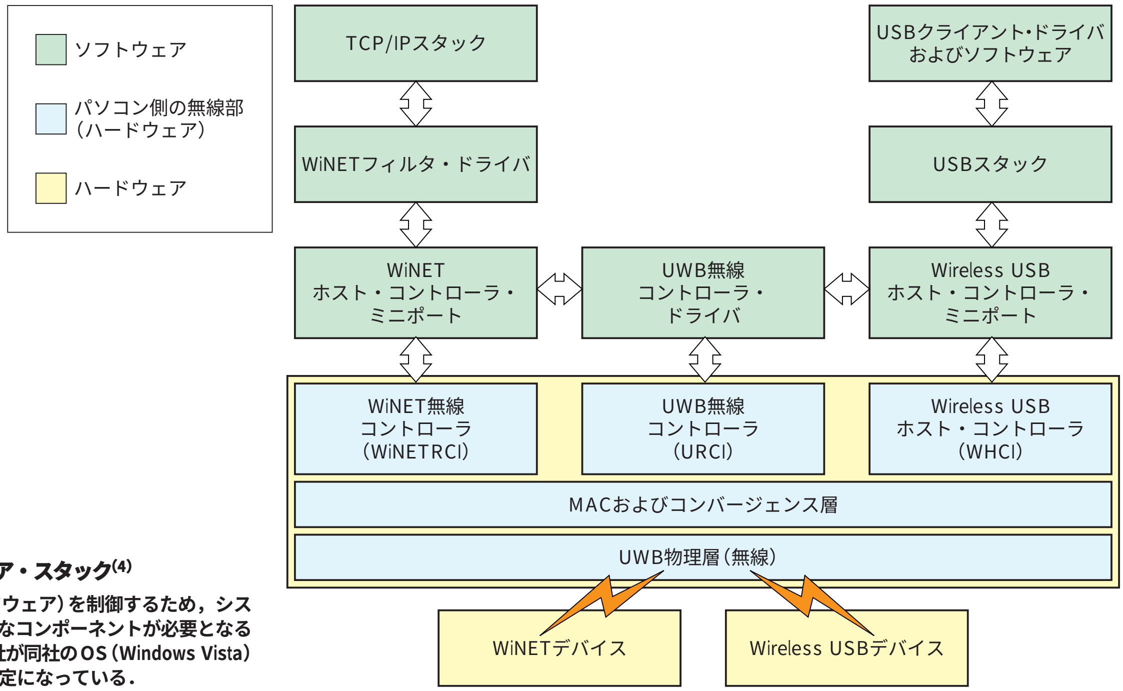
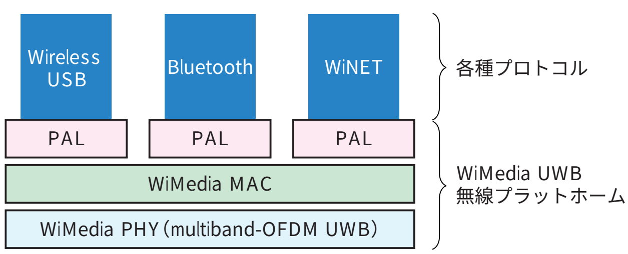


図3
ホスト側のソフトウェア・スタック(4)
UWBの無線部分(ハードウェア)を制御するため，システム・レベルのさまざまなコンポーネントが必要となるが，これらはMicrosoft社が同社のOS(Windows Vista)で正式にサポートする予定になっている．



PAL：protocol adaptation layer

図4　WiMediaのUWB無線プラットホーム(4)
WiMedia Allianceが策定するUWB無線プラットホームは，Wireless USB以外にも，Bluetooth，IP(internet protocol)を用いるWiNETなど，複数のプロトコルにおける利用を目ざしている．

WiMedia Allianceが策定するUWB無線プラットホームは，Wireless USBの物理層としてだけでなく，BluetoothやIEEE1394などでも利用できます(**図4**)．同じ無線プラットホームを使いながら異なるプロトコルを流して接続できるので，現行のUSBよりもさらに利用範囲が広がると予想されます．

2. Wireless USB 物理層の評価

2006年9月に，Wireless USBのテスト仕様「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0（以下，WiMedia C&I testと略す）」が公開されました[注4]．ここではこのテスト仕様をもとにWireless USBの物理層の信号や評価方法などを解説します．

2-1 Wireless USB 仕様における信号

上述したようにWireless USBの無線通信方式は，WiMedia Allianceが定めたMB-OFDM方式のUWBを利用します（p.103のコラム「OFDM方式」を参照）．

● サブキャリアを128本用意し，各国の電波法に対応

UWBは一般に，500MHzを超える広い帯域を占有し[注5]，放射（輻射）電力を抑えて高速通信を実現する手法として注目を集めています．WiMediaのMB-OFDM方式では，3.168GHz～10.56GHzの7.392GHzの帯域を14のサブバンドに分割し，それらを三つのサブバンドずつ[注6]にまとめて五つのバンド・グループに分けて利用します（図5）．

この同一バンド・グループ内の三つのサブバンドを切り替えながら通信することで1.584GHzの超広帯域を利用できます．このサブバンドが占有する528MHzの帯域は128本のサブキャリア（トーン）で実現されており，各サブキャリアが4.125MHz間隔で配置され，OFDM方式で合成しています（p.103のコラム「OFDM方式」を参照）．図6は，このサブキャリアの配置を示しています．128本のサブキャリアのうち，6本をヌル（null），10本をガード（guard），12本をパイロット（pilot）として利用し，残り100本をデータとして使います（表1）．パイロットは，受信機と同期をとるために10本ごとに入れられます．ヌルは，隣接したチャネルとの干渉を防ぐために電力をゼロにして分離を図りま

注4：本仕様書をダウンロードするにはWiMedia Allianceのメンバになっている必要がある．
注5：総務省令では「450MHzを超えるもの」と規定されている．
注6：5番目のバンド・グループのみ，二つのサブバンドからなる．

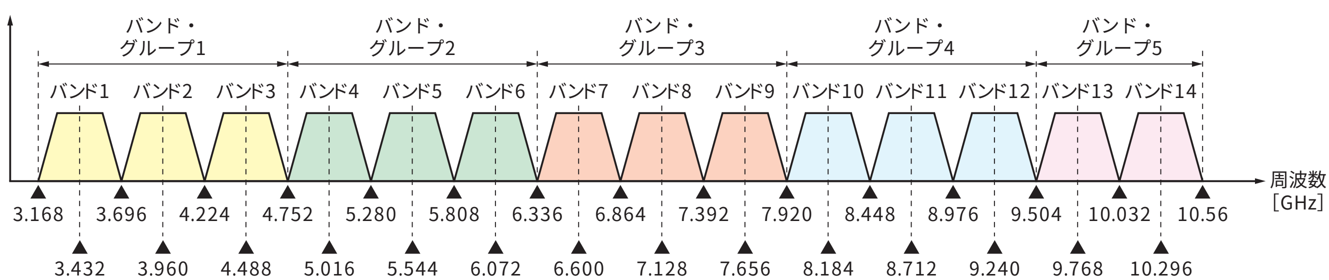


図5 UWBで利用する周波数帯(6)
WiMedia AllianceのUWBは，全体を14のサブバンドに分割し，その三つずつをバンド・グループ（バンド・グループ5のみサブバンドが二つ）としてまとめて利用する．

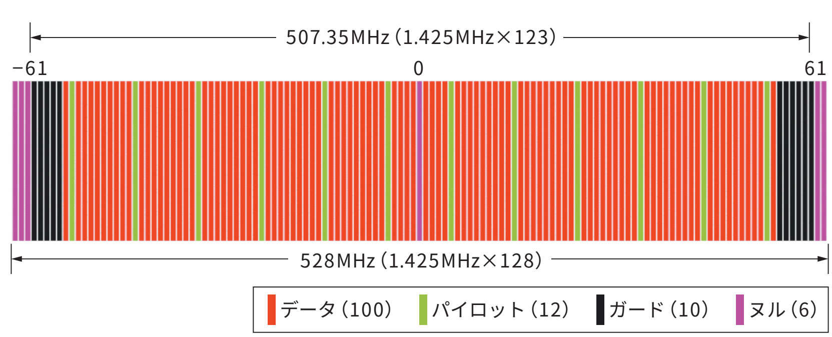


図6 UWBのサブキャリアの配置(6)
全部で128本のサブキャリア（トーン）を，100本のデータ，12本のパイロット，10本のガード，6本のヌルに分けて配置する．

す．ガードは，各国の事情に合わせてFCC(Federal Communications Commission；米国連邦通信委員会)や総務省などが定める電波規制に適合するよう，電力レベルを任意に変更できます．

実際に通信するディジタル・データは，データ・サブキャリアをその伝送速度に応じてQPSK(quadrature phase shift keying)もしくはDCM(dual carrier modulation)を用いて変調し転送します(**表2**)．

サブバンドを切り替える方法は7種類規定されていて，TFC(time frequency code)と呼ばれるコードで指定します．**表3**に示すように，TFCは，周波数ホッピングを用いるTFI(time frequency interleave；表の黄色の部分)と，周波数ホッピングを用いないFFI(fixed frequency interleave；表の黄緑色の部分)に分類でき，TFIで四つ，FFIで三つのコードが用意されています．これらのサブキャリアは，その周波数間隔である4.125MHzに対応する242.42nsの継続時間のバーストとして送信されますが，このバーストをシンボルと呼びます．シンボルとシンボルの間には送信機および受信機の周波数切り替えの時間を確保するため，またマルチパスの影響を軽減するために，ゼロ・パディング(zero-padded suffix；‘0’を詰めてデータ長を固定すること)され，312.5ns間隔で送信するようになります．例えばTFC＝1の場合，シンボルごとにバンドを1，2，3，1，2，3の順番で切り替えることになっています．このようすを図式化したものを**図7**に示します．

表1　タイミング・パラメータ(1)，(6)

パラメータ	内　容	値
f_s	サンプリング周波数	528［MHz］
N_{FFT}	サブキャリアの合計数(FFTのサイズ)	128
N_D	データ・サブキャリアの数	100
N_P	パイロット・サブキャリアの数	12
N_G	ガード・サブキャリアの数	10
N_T	使われるサブキャリアの合計数	122 ($N_D+N_P+N_G$)
D_f	サブキャリア周波数の割り当て	4.125［MHz］(f_s/N_{FFT})
T_{FFT}	IFFT，FFTの周期	242.42［ns］
N_{ZPS}	ゼロ・パディング内のサンプル数	37
T_{ZPS}	ゼロ・パディングにかかる時間	70.08［ns］($=N_{ZPS}/f_s$)
T_{SYM}	シンボル周期	312.5［ns］($=T_{FFT}+T_{ZPS}$)
F_{SYM}	シンボル周波数	3.2MHz ($=T_{SMS}^{-1}$)
N_{SYM}	シンボルごとのサンプル合計数	165 ($=N_{FFT}+N_{ZPS}$)

表2　ビット・レートと変調方式(1)，(6)

伝送速度［Mbps］	変調方式	コーディング・レート	FDS	TDS	N_{CBP6S}	N_{IBP6S}
53.3	QPSK	1/3	YES	YES	300	100
80	QPSK	1/2	YES	YES	300	150
106.7	QPSK	1/3	NO	NYES	600	200
160	QPSK	1/2	NO	YES	600	300
200	QPSK	5/8	NO	YES	600	375
320	DCM	1/2	NO	NO	1200	600
400	DCM	5/8	NO	NO	1200	750
480	DCM	3/4	NO	NO	1200	900

N_{CBP6S}：コード・ビット/6OFDMシンボル
N_{IBP6S}：情報ビット/6OFDMシンボル

表3　TFCの周波数ホッピング・パターン(1)，(6)

TFC	ベース・シーケンス/プリアンブル	TFCのバンドID (n_b)					
1	1	1	2	3	1	2	3
2	2	1	3	2	1	3	2
3	3	1	1	2	2	3	3
4	4	1	1	3	3	2	2
5	5	1	1	1	1	1	1
6	6	2	2	2	2	2	2
7	7	3	3	3	3	3	3

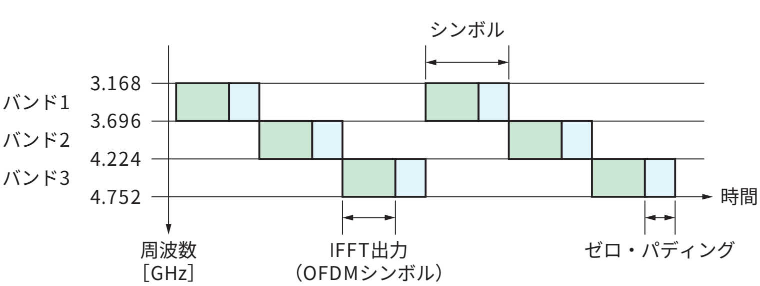


図7　TFC＝1のホッピング(1)，(6)

TFC＝1では，サブバンドを1，2，3，1，2，3とシンボルごとに切り替える．また，各シンボルの後ろには必要な数だけ‘0’が挿入(zero padded suffix)される．



写真1　Wireless USBの測定に対応したディジタル・オシロスコープの例

米国LeCroy社のディジタル・オシロスコープ「SDA 11000」．測定帯域は11GHz，サンプリング速度は40Gサンプル/s，メモリ長は100Mワード．UWBの解析機能「SDA-UWB」をオプションで搭載できる．

● WiMediaのテストに必要な測定器の性能

以上，WiMedia Allianceの定めるUWB信号の概要を見てきましたが，現在のPHYチップはバンド・グループ1を使って通信を行います．最大4.752GHzまでの帯域を使うため，物理層の評価には5GHz以上の帯域を持つディジタル・オシロスコープが必要となります．サンプリング速度は20Gサンプル/s以上が適当とされています．測定対象が無線信号なので，一般的なシリアル・インターフェースの信号を取り扱うときのような，高調波成分に対する考慮は不要です．

将来的には，さらに周波数の高いバンド・グループに対応したPHYチップが開発されると思います．その場合は10.56GHzまでの帯域が対象となるため，11GHz以上の帯域を持ち，40Gサンプル/s以上のサンプリング速度を備えたディジタル・オシロスコープが必要とされます．また，捕捉したWireless USBの信号を解析して評価する解析ソフトウェアが必要となります（写真1）．

従来の無線通信信号の評価に用いられてきたスペクトラム・アナライザやベクトル信号解析器，周波数軸の計測器などは，利用する帯域が広いことや，高速で周波数ホッピ

COLUMN OFDM方式

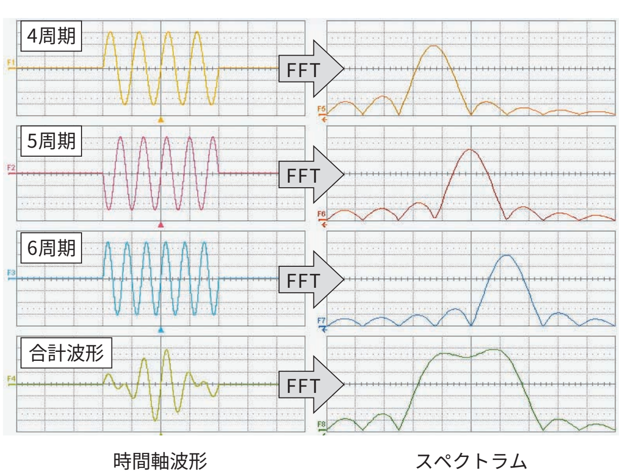
OFDM（orthogonal frequency division multiplexing；直交波周波数分割多重）方式[注A-1]はディジタル変調方式の一つで，情報を周波数で分割して多重化するFDM（frequency division multiplex；周波数分割）の一種です．各サブキャリアの直交性を利用することによりスペクトラムの重なりを許すため，利用効率が高くなります．この直交性と広帯域という特徴を理解するため，ディジタル・オシロスコープの波形を見ながら順を追って説明します．

OFDMでは，複数の正弦波をバースト状にして送信を行います．直交性を確保するため，用いる正弦波の周期とバースト長が整数倍の関係になるようにしています．図A-1の左側に，バーストの中に4周期，5周期，6周期が入る3種類の正弦波とその合成を示します．また，右側にそれぞれの波形に対応するスペクトラムを示します．この図から，合成された信号は最終的に3倍の帯域を占有することがわかります．

図A-2では直交性を確認するため，それぞれの波形とスペクトラムを重ね合わせています．それぞれのスペクトラムは，正弦波の周波数を中心としたsin x/x 関数になります．三つのスペクトラムは互いに重なり合っていますが，それぞれのスペクトラムの中心点ではほかのスペクトラムのゼロ点になっているために，干渉を受けることがないことがわかります．このようにほかの影響をまったく受けない関係を「直交関係にある」と言います．

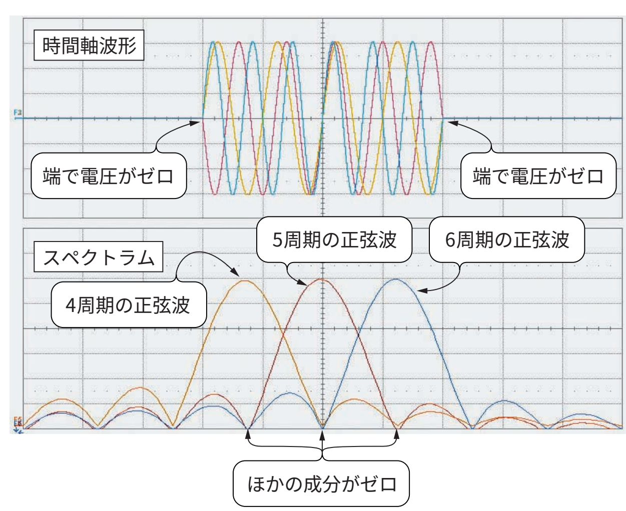
こうした直交関係を持つ正弦波を複数使うことにより，広い帯域を効率的に利用できるのがOFDMの特徴です．WiMedia AllianceのMB-OFDMでは，128本のサブキャリアを用います．バースト長が242nsであるため，個々のサブキャリアの間隔が4.125MHzとなり，128本全体で528MHzの帯域となります．実際にはヌル・サブキャリア（本文の図6を参照）を使っているため，528MHzの帯域をすべて使っているわけではありません．

注A-1：WiMedia Allianceでは，orthogonal frequency division modulationとしている．



図A-1 バースト正弦波

正弦波をバースト状にして送信したとき，バースト持続時間が同じで，かつ正弦波の周期と整数比の関係である場合，そのスペクトラムの形はまったく同じ形になり，周波数オフセットが変わる．



図A-2 重ね合わせ

スペクトラムを重ね合わせて表示すると，各スペルトラムのピーク位置ではほかのスペクトラムがゼロになること（直交性）を確認できる．

ングを行うなど，瞬時に広帯域の信号解析が必要となるため，UWBのテストには不適当と考えられています．しかし，FCCや総務省令で規制される放射電力の計測には，従来どおりスペクトラム・アナライザが用いられることになります．広帯域のディジタル・オシロスコープが必要となるのは，あくまでもWiMedia Allianceの定めるコンプライアンス・テストにおいてです．

2-2 実際の信号の考察

では，実際の信号をディジタル・オシロスコープで見てみましょう．

● プリアンブル，ヘッダ，ペイロードでパケットを構成

図8に，実際に捕捉したUWBの信号波形の1パケット分を示します．図8の下側の拡大波形から，先ほど説明したように1パケットがバースト状の複数のシンボルから構成されており，シンボルの繰り返し周期が312.5nsであることがわかります．

このパケットをよく見ると，振幅が部分ごとに異なっています．これは，UWBの信号の構造によるものです(図9)．最初の30シンボルがPLCP(PHY Layer Convergence Protocol)プリアンブル(標準プリアンブルの場合)です．その後，12シンボルのPLCPヘッダ，ペイロードであるPSDU(PHY Service Data Unit)が続きます．PLCPプリアンブルは，24シンボルのパケット/フレーム同期信号と6シンボルのCE(Channel Estimation)に分かれています．図8の信号において，振幅がいったん小さく平らになって見える部分がCEに相当します．パケット/フレーム同期信号はTFCコードごとに異なるシーケンスが与えられていて，レシーバがTFCを判断できるようになっていると同時に，時間軸方向の同期がとれるようになっています．CEの部分では，送信機と通信媒体を合わせたチャネルの周波数軸上における特性を検証できます．

図10は，25番目のシンボル，つまりCEの最初のシンボルを復調して，各サブキャリアの特性をプロットしたものです．上側のグラフは振幅特性を1目盛り当たり3dBで描いたものです．下側のグラフは位相特性を1目盛り当たり45 °で描いています．横軸は周波数で，真ん中がバンドの中心周波数，左右の端に行くほど周波数が中心からずれています．グラフの点は各サブキャリアで計算された値を示しています．プラス側もマイナス側も端では振幅がかなり落ちていることがわかります．とくにプラス側では18dB程度も減衰しています．位相特性はそれぞれグリッドの線に沿って直線であることが理想的ですが，大きな変位は確認できません．CEのシンボルもほかのシンボルと同じように周波数ホッピングするので，対応するバンドの特性を示すことになります．図10の例ではTFC＝1なので，CEの最初のシンボルはバンド1の特性を示すこととなります．こうして得られた特性を基準として，各サブキャリアに対して振幅および位相が理想の特性になるように補正します．これをイコライゼーション(等化)と呼びます．イコライゼーションはプリアンブル以降のPLCPヘッダとPSDUに対して行われます．

図11に，43番目のシンボル，つまりPSDUの最初のシンボルを解析した例を示します．イコライゼーションが行われているので振幅特性も位相特性もきれいにほぼ一直線に並んでいます．

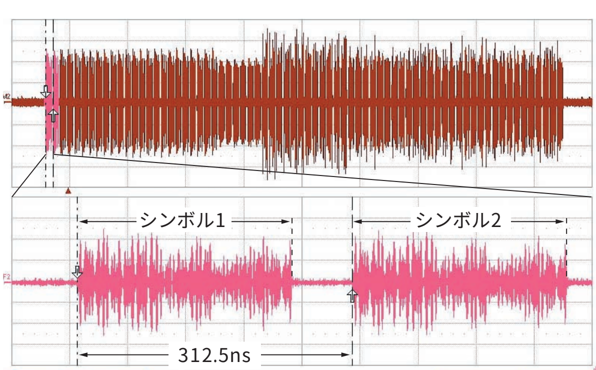


図8　UWBの1パケットの信号

図からUWBのパケットが複数のシンボルからなり，各シンボルの繰り返し周期が312.5nsであることが確認できる．

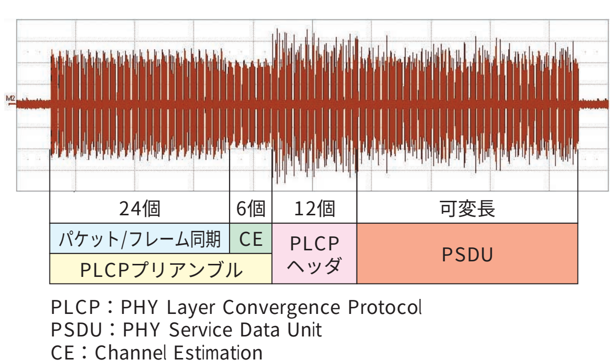


図9　UWBの1パケットの構造

UWB信号のパケットは，PLCPプリアンブル，PLCPヘッダとPSDUから構成されている．

● 周波数特性をスペクトログラムで見る

こうしたUWBの信号をFFTして周波数成分を見てみると，1.584GHzの帯域を持ち，三つのバンドからなっていることがわかります(図12)．

しかし，全体をFFTしてしまうとバンドを切り替えるホッピングのようすがわかりません．また，それぞれのバンドで送信しているときのスペクトラムの確認も行えません．そこで，最初の三つのシンボルを個別に拡大して表示し，そのそれぞれのシンボルをFFTして周波数スペクトラムに変換してみました．この結果を図13に示します．バンドを切り替えながら広い帯域を利用していることがわかります．

このようにOFDMを用いて500MHzを超える帯域を占有しながら，さらに周波数ホッピングを活用することでさらに広い帯域を利用できるのがMB-OFDM方式の特徴です．しかし，残念ながらシンボルそれぞれを個別にFFTする方式では，周波数ホッピングのふるまいを捕らえることが困難です．そこで，スペクトログラムという手法を用います．スペクトログラムは，周波数ホッピングのようすを視覚的にわかりやすく表現できるので，信号の周波数軸におけるふるまいを概観するのに有効です．

スペクトログラムにおいては，横軸が時間，縦軸が周波数と信号強度として，色分けされて表示されます．こうすることによってそれぞれのバンドの広がりと，そのバンドの切り替えを時系列で見ることができます．図14にその例を示します．この図では，バンド・グループ1の中心周波数3.96GHzを中心として，縦軸が1目盛り当たり264MHzで描かれているので，ちょうど2メモリが各バン

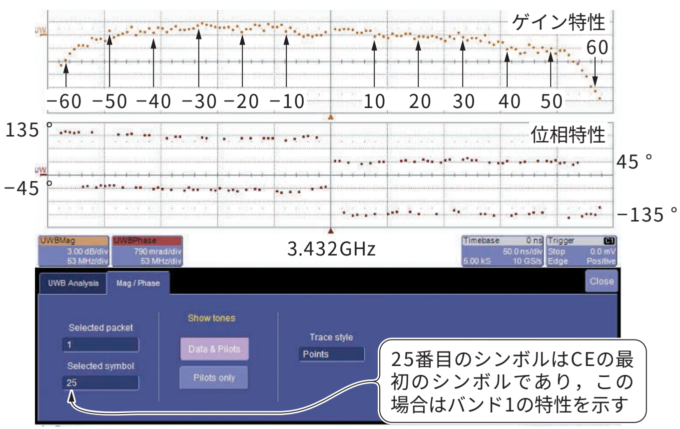


図10　CEの解析

CE(Channel Estimation)を解析すると，そのチャネルの特性を知ることができる．図の例では，TFC＝1の信号であるため，最初のCEはバンド1の特性を示すことになる．

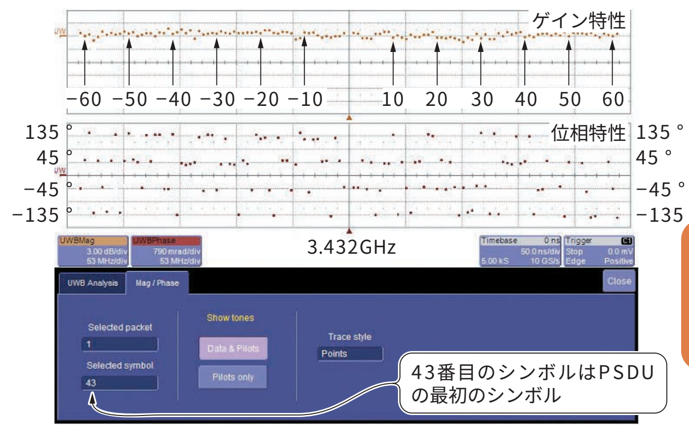


図11　ペイロード部の解析

ペイロード部分では，CEで得られたチャネルの特性を利用して振幅や位相の補正が行われている．

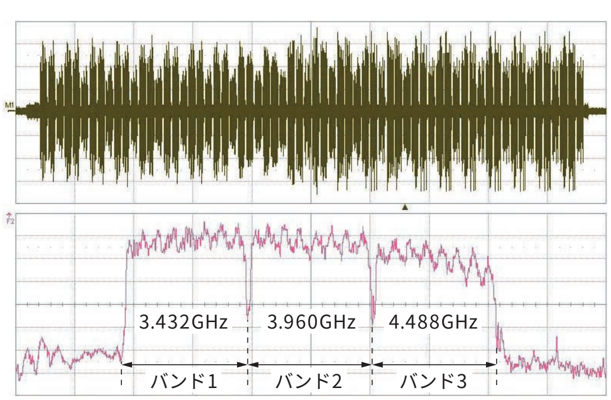


図12　UWB信号の全スペクトラム

UWB信号の1パケットをすべて用いてFFTをかけると，全体のスペクトラムが得られる．この図では，三つのバンドを利用して3倍の帯域が得られていることがわかる．

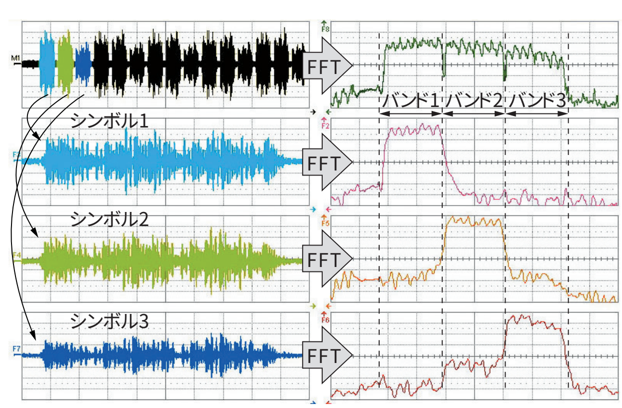


図13　UWBの各バンドのスペクトラム

パケットの1～3番目のシンボルをそれぞれFFTし，個別にスペクトラムを計算して比較している．シンボルごとにバンドが切り替わっていることがわかる．

3

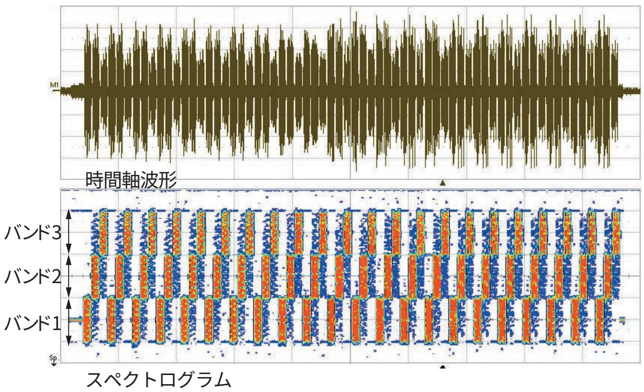


図14　UWBのスペクトログラム

スペクトログラムでは視覚的にシンボルごとの周波数ホッピングのようすを容易に捕らえることができる．時間軸波形との時間相関がとれるので，どのシンボルがどのバンドであるのかを理解しやすい．

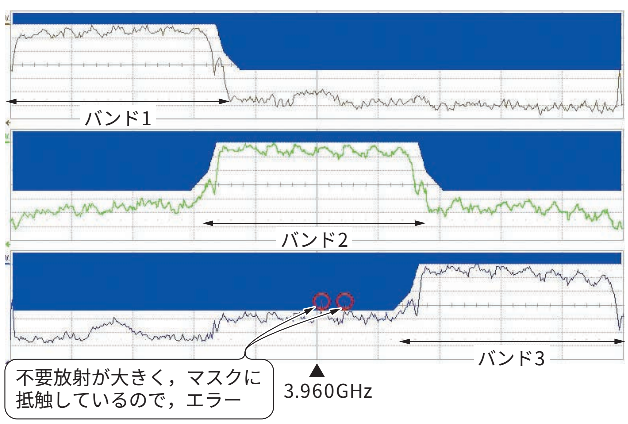


図16　マスク・テスト

TFC＝1の信号なので，三つのバンドを利用しており，それぞれのバンドでマスク・テストが行われる．この図ではバンド3のマスクで不良の判定がなされている．

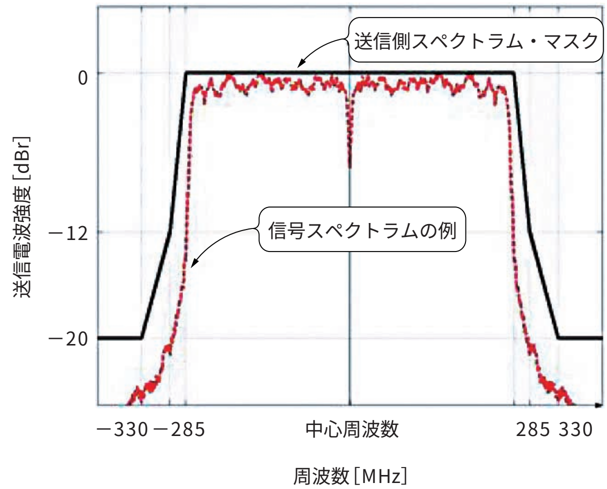


図15　UWBのマスク

WiMedia C&I testでは，送信電波のスペクトラム・マスクが定義されている．不要放射のレベルが送信電力に対して相対的に20dB以下であることを求めている．

ドの幅になります．横軸は上の時間軸波形に合わせてあるため，シンボルごとに周波数がホッピングしているようすがはっきりとわかります．また，シンボルごとに528MHzの帯域を占有していることも明確です．よく見ると，バンド1を送信しているときには問題がないように見えますが，バンド2を送信しているときにはバンド1とバンド3に不要放射があるように見えます．また，バンド3を送信しているときには，バンド2の不要放射が大きいように見えます．図13のように，一つ一つのシンボルをFFTすることで得られた個別の周波数スペクトラムとも整合しています．したがって，この信号の品質を検証する必要があることを示唆しています．

2-3　コンプライアンス・テストの評価基準

WiMedia Allianceのコンプライアンス・テストにおいては，UWB信号の品質を評価するため，いくつかのテストを要求しています．上述した不要放射の強度測定もその一つとして挙げられています．以下にテスト内容を紹介します．

● スペクトラム・マスク・テスト：不要放射レベルを確認

スペクトラム・マスク・テスト注7は，WiMedia Allianceの定めるMB-OFDM方式を用いて送信される電波が，不要な電波の放射が行われない（ほかの通信機器に妨害を与えない）ことを確認するため，周波数マスクを規定してその中に収まることを求めています（図15）．具体的には，送信電力と比較して不要放射の電力が20dB以下であることを要求しています．

図15の例では，バンド2およびバンド3を送信している際に不要放射があるようなのでマスクに照らし合わせて評価しなければなりません．図16に，スペクトラム・マスクの評価を行った例を示します．対象の信号がTFC＝1で三つのバンドを利用しているので，それぞれのバンドは個別のマスク・データを使って判定します．最初に述べたように判定は相対レベルで行うため，計測されたスペクトラ

注7：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.4を参照．

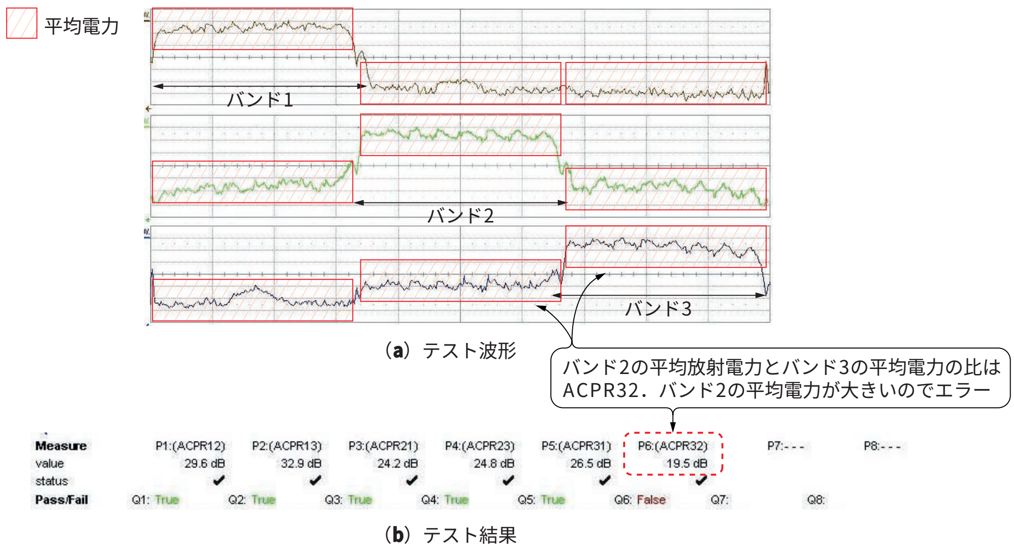


図17
ACPRテスト

ACPRテストでは，各バンドにおける送信電力と不要放射の平均電力を計算し，比をとって判定を行う．この図は，バンド3で送信しているときのバンド2における不要放射レベルが高すぎる例を示している．

ム・データとマスク・データは送信バンドにおけるピークをマスクの下限に合わせるようにレベルを調整し，非送信バンドの放射レベルを判定します．ここで示されたそれぞれのバンドに対応する周波数スペクトラムは，信号全体を対象としています．しかし，全体でFFTを行うと**図12**のように3バンド合わせた全体のスペクトラムとなるため，以下のような手順で計算が行われます．

まず，各シンボルでFFTを行い，個別のスペクトラムを計算します．こうして計算されたスペクトラムのうち，同一バンドに対応するスペクトラムを合計してそれらの平均を求めています．スペクトラムを計算する際に用いる分解能バンド幅は，5MHzで測定することになっています．スペクトログラムで予想されたように，バンド2で送信しているときのバンド1とバンド3の不要放射は，バンド1で送信しているときのほかのバンドにおける不要放射と比較すると相対的に高いレベルにありますが，規格内には収まっています．しかし，バンド3で送信しているときにバンド2の不要放射はさらに高いレベルにあり，その一部がマスクにかかっています．不良と判定された箇所は丸（**図16**の中の赤い丸で囲んだ部分）で示されており，送信ICの改善が求められます．

● ACPRテスト：送信電力と不要放射の平均をとって比較

スペクトラム・マスク・テストがピーク電力の相対レベルで判定するのに対して，ACPR（Adjacent Channel Power Ratio）テスト[注8]では，各バンドにおける平均電力の比を求めて判定を行います．

例えば，バンド1で送信している場合，バンド2およびバンド3の平均電力は，バンド1の平均電力よりも20dB以上低くなくてはなりません．このように一つのバンドで二つのパラメータが計算されるので，FFIモードの場合は判定するパラメータの数は二つですが，TFIモードの場合には合計六つのパラメータが計算され，それぞれを判定しなければなりません．

上述のスペクトラム・マスク・テストを行った同じ信号を使い，ACPRの計測を行った例を**図17**に示します．このテストでは，最後のパラメータが不合格と判定されています．バンド3を使って送信しているときのバンド2の放射電力がやはり大きいと判断されています．

なお，これらのスペクトラム・マスク・テストとACPRテストはWiMedia Allianceが定めた規格であり，送信電力と不要放射の相対値をピーク，あるいは平均値で判定しています．総務省令では電波の電力を絶対レベルで規定していますし，分解能バンド幅などもWiMedia Allianceの規定とは異なります．したがって，WiMedia Allianceのテストに合格したからといって，日本国内での運用が認められるわけではないことに注意してください（p.110のコラム「Wireless USBに関する国内の法整備」を参照）．

注8：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.4.1を参照．

3

● EVMテスト：ディジタル変調の精度を測定

送信された信号から正しくデータを読み取るには，送信機側でQPSKまたはDCMで変調されたデータの変調精度が問題となります．この変調精度の判定を行うのが，EVM（Error Vector Magnitude）テスト[注9]です．WiMedia Allianceのテスト仕様では“Constellation[注10] Error”と示され，図18に示す式で計算することになっています．このようにして計算されたEVMは，表4に示した基準に照らし合わせて判定されます．

表4　EVMテストの判定基準(1)，(6)

パラメータ	内　容	最大値［dB］
EVM1	伝送速度が0，TPCが0dBの場合の測定値	－16
EVM2	伝送速度が200Mbps～480Mbps，TPCが0dBの場合の測定値	－18
EVM3	伝送速度が200Mbps，TPCが8dB（TFC＝7）またはTPCが12dB（TFC＝1）の場合の測定値	－13.5

TPC：transmit power control（送信機出力制御）

図19に，200Mbpsまでの伝送速度で用いられるQPSKのコンスタレーション表示を示します．計測されたEVMの値は－14.31dBと規格を下回っています．この理由については別途解説します．

図20に，200Mbpsを超える伝送速度で用いられるDCMのコンスタレーション表示を示します．DCMは基本的に16QAM（quadrature amplitude modulation）ですが，二つのサブキャリアに配置されるのでDCMの名が付けられています．一般的な16QAMの場合は16個のステートになるはずですが，ここでは18個のステートを確認することができます．これは，データ・サブキャリアに対してはDCMが用いられますが，パイロット・サブキャリアに対してはQPSK

注9：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.5を参照．
注10：constellation（コンスタレーション）とは，ディジタル変調において位相と振幅を極座標にプロットしたもの．

$$RMS_{error}=\frac{\displaystyle\sum_{f=1}^{N_f}\sqrt{\sum_{n=N_{sync}+N_{hdr}}^{N_{packet}}\left[\frac{\displaystyle\sum_{k=1}^{N_D}\left|R_{D,n}[k]-C_{D,n}[k]\right|^2+\sum_{k=1}^{N_P}\left|R_{P,n}[k]-C_{P,n}[k]\right|^2}{(N_D+N_P)N_{frame}P_0}\right]}}{N_f}$$

N_f　：計算に使われたパケットの数
N_{packet}：パケット当たりのシンボルの数
N_{sync}　：PLCPプリアンブル内のシンボルの数
N_{hdr}　：PLCPヘッダ内のシンボルの数
N_{frame}：PSDU内のシンボルの数．$N_{packet}-N_{sync}-N_{hdr}$ で求まる
N_D　：データ・サブキャリアの数
N_P　：パイロット・サブキャリアの数
P_0　：データとパイロットのコンスタレーションの平均電力
$C_{D,n}[k], C_{P,n}[k]$：送信されたはずのn番目のシンボルの，k番目のデータ・サブキャリアおよびk番目のパイロット・サブキャリア
$R_{D,n}[k], R_{P,n}[k]$：受信されたn番目のシンボルのk番目のデータ・サブキャリアおよびk番目のパイロット・サブキャリア

図18　変調精度（EVM）を求める式(1)，(6)
WiMedia Allianceのテスト仕様で規定されている．

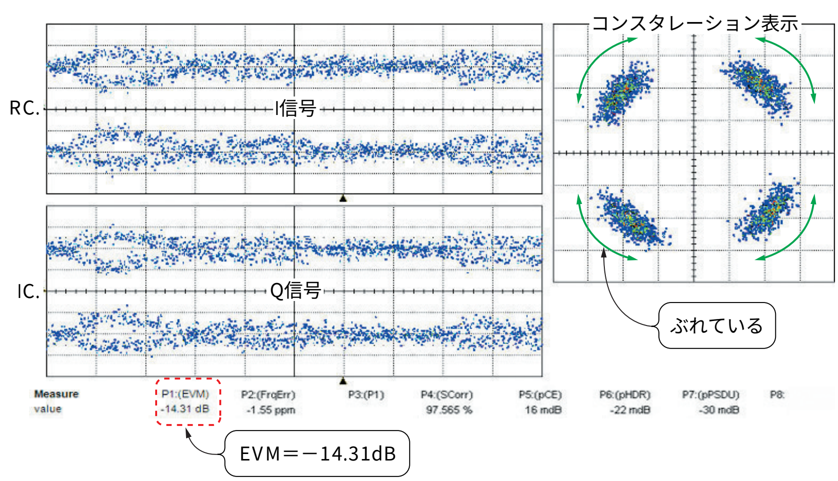


図19
QPSKのコンスタレーション
本来四つのステートになるはずのコンスタレーションが回転ブレを起こしてしまい，EVMが－14.31dBと低い値しか示していない．

が使われるからです．つまり，データ・サブキャリアの16個のステートとパイロット・サブキャリアの2個[注11]のステートが重なって，18個のステートが見えるのです．**図18**の式から，データ・サブキャリアだけでなくパイロット・サブキャリアも計算の対象となるため，この18個のステートのコンスタレーションがテストの対象となります．

このEVMの評価では，PSDUに96個のシンボルが含まれるパケットを最低三つ使って評価することとしています．また規格に対して2dB以内となった場合，10パケットを使って評価し直すことと規定されています．

● 周波数誤差は±20ppmまでを許容

送信機の周波数許容誤差は，テスト仕様では送信中心周波数許容誤差，シンボル･クロック周波数許容誤差として±20ppmと規定されています[注12]．レシーバのシミュレーションにおいて，データを復調する際に周波数偏差が計算されます．

図20(b)において周波数誤差はEVMの値の横に表示されています．この例では10ppm以下を示しており，良好な結果になっています．

● Sync相関テスト：相関係数は87％以上

Sync相関テスト[注13]は，PLCPプリアンブルのパケット/フレーム同期信号の質を評価するものです．Wireless USBで用いられるUWBでは，パケット/フレーム同期信号と，システム内部で作りだされるTFCの値で一義的に決められるシーケンスの相互相関をとって，シンボル開始のタイミングと位相の基準を得ています．この情報の精度はパケット/フレーム同期信号の質に依存し，相互相関をとるときの相関係数によって評価できます．

注11：パイロット・サブキャリアではQPSKの四つのステートのうち二つのステートだけを使う．
注12：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.5を参照．
注13：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.2.4を参照．

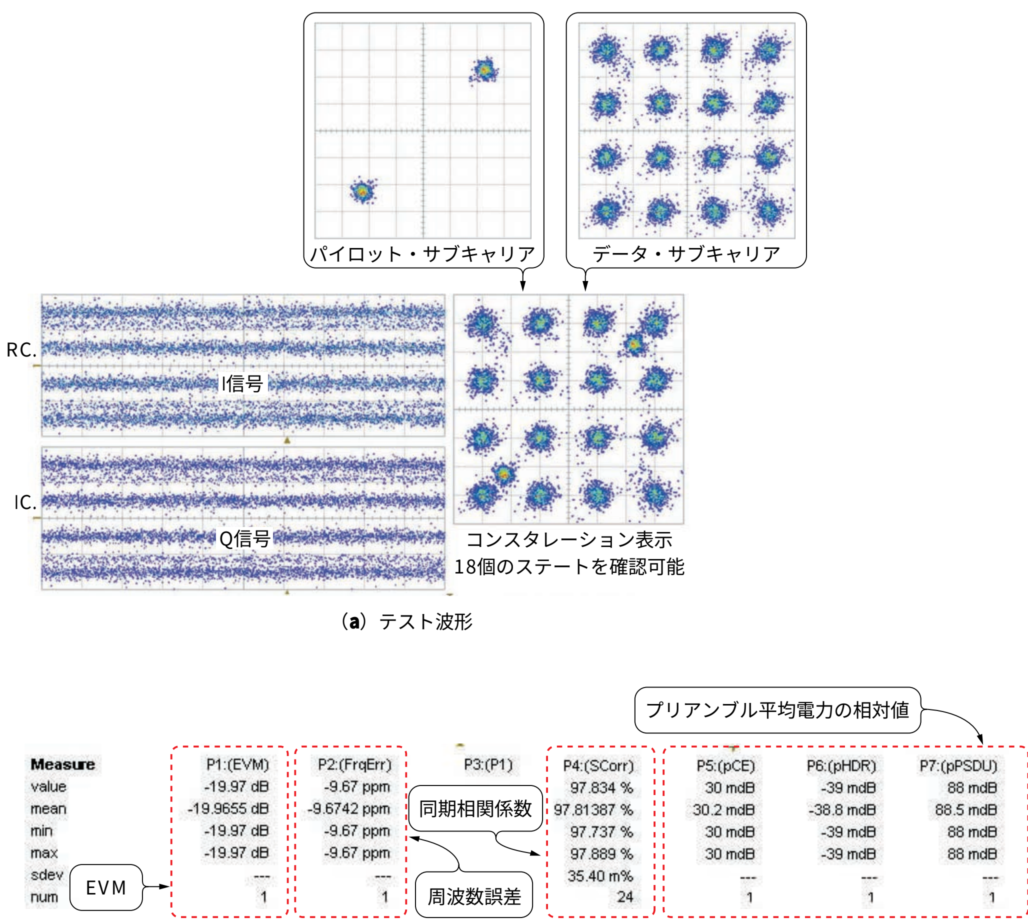


図20 DCMコンスタレーション
16QAMで送られるデータ信号の16個のステートと，QPSKで送られるパイロット信号の二つのステートの合計18個のステートを確認できる．これは，データ信号の16個のステートとパイロット信号（伝送速度に関係なくつねにQPSKで送られる）の二つのステートが重なるためである．

例えば，図20(b)のテスト結果のSCorrというパラメータはこの相関係数を示しています．テスト仕様ではこの値が87%以上と決められています．SCorrの最後の行が24となっているのは，パケット/フレーム同期信号に含まれる24シンボルすべてにおいて相関を計算したことを示しています．97%以上と高い相関を示しているので，この例では良好な同期がとれていることがわかります．

● プリアンブル相対電力テスト：平均電力の変動を評価

プリアンブル相対電力テスト[注14]は，パケットの異なるセクションにおける電力の安定度を見るためのものです．

注14：詳細は「WiMedia Compliance and Interoperability Test Specification version 1.0」のセクション5.2.2.5を参照．

基準となるのはPLCPプリアンブルのパケット/フレーム同期信号です．この信号の平均電力を基準としてCE，PLCPヘッダ，PSDUのそれぞれの平均電力が大きく変動しないことを求めています．規格では，それぞれの平均の相対値が±2dB以内であることを求めています．

例えば，図20(b)のSCorrの右側に示されているパラメータは，それぞれCE，ヘッダ，およびPSDUの電力の相対値を示しています．十分に安定した電力レベルであることがわかります．

2-4 EVM評価の詳細

変調精度(EVM)を計算するには，実際のレシーバが行

COLUMN Wireless USBに関する国内の法整備

Wireless USB装置がWiMedia Allianceの仕様に適合していても，FCCが定める技術基準に適合していても，日本国内での運用が認められるわけではありません．あくまでも，国内の電波法に従わなければなりません．ここでは，マイクロ波帯を用いた通信用途のUWB無線システムの導入に対応した総務省令の改正について概観します．

まず，簡単に経緯をまとめます．平成18年(2006年)3月27日に情報通信審議会情報通信技術分科会は，総務省が諮問した「UWB無線システムの技術的条件」に対して，「マイクロ波帯を用いた通信用途」に限り一部答申を行いました．これを受けて総務省は同年5月17日，関連する省令などの改正案を電波監理審議会に諮問しました．同年7月12日に電波監理審議会から答申を受けた総務省は，改正した省令などを同年8月1日に公布/施行しました．

改正されたのは，電波法施行規則の一部，無線設備規則の一部，特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則の一部です．詳細は総務省のホームページ(9)で確認してください．ここでは，筆者が機器開発にあたって重要と考える箇所を紹介します．

まず重要なことは，屋内使用に限定されているということです．また，使用する周波数帯が「3.4GHz以上4.8GHz未満」または「7.25GHz以上10.25GHz未満」(電波法施行規則第4条の4第2項の2を参照)であり，この二つの周波数帯が二者択一になっています．それぞれの周波数帯における空中線電力は平均電力－41.3dBm/MHz以下，および尖頭電力0dBm/50MHz以下でなければなりません．ただし，送信空中線の絶対利得は0dB以下でなければなりませんが，EIRP(等価等方輻射電力)が前述の空中線電力を絶対利得0dBの空中線に加えたときよりも小さくなる場合には，空中線の利得で補うことができるので，実質的にはEIRPの上限を制限していることになっています(無線設備規則第49条の27の5および6を参照)．

もう少し詳しく見てみると，屋内での使用に限定するために次のことが必要となります．

- 屋内でしか電波の発射が認められていないことを，装置の見やすい場所に明示すること．
- 交流電源を使用していない装置は，交流電源を使用している装置からの信号を受信した場合でなければ電波の発射を禁止すること．

後者は，UWB無線通信を用いたネットワークを構築する場合，ネットワークを構成する無線機器の少なくとも一つが交流電源を使用していることを確認できなければならないことになります．つまり，ネットワーク全体を屋内で使用することに限定しています．また，「3.4GHz以上4.8GHz未満」の帯域においては，干渉を軽減する機能を搭載する必要があります(無線設備規則の第49条の27の3および4を参照)．WiMedia Allianceで議論されているDAA(detect and avoid)もこの干渉を軽減する技術の一つですが，日本国内の技術条件として採用されるかどうかは今後の審議に委ねられています．干渉を軽減する機能の技術的条件が決まり次第，告示されることになります．

経過措置として，平成20年(2008年)12月31日までの間に限り，干渉を軽減する技術を搭載していない装置でも「3.4GHz以上4.8GHz未満」の周波数帯を利用することができます．ただし，「4.2GHz以上4.8GHz未満」の周波数では，空中線電力は平均電力が－41.3dBm/MHzまで，尖頭電力が0dbm/50MHzまで許されますが，「3.4GHz以上4.2GHz未満」の周波数では，空中線電力が平均電力－70dBm/MHzまで，尖頭電力－30dBm/50MHzまでに制限されます(無線設備規則の附則を参照)．

ここで紹介したように，WiMediaの仕様とは異なる部分が少なくないので注意が必要です．なお，装置は証明機関が行う試験に合格し，技術基準適合証明，または工事設計認証を得られれば，免許不要で運用が認められます．つまり，メーカが認証を得た装置については，ユーザは屋内使用など定められた条件に従う限り，現行の無線LAN装置のように簡単に使うことができるということです．

っているのと同じように信号の復調を行い，その過程における変調精度を評価します．そのため，レシーバの回路をシミュレーションしなければなりません．

● レシーバのシミュレーション

図21を使ってレシーバの動きを解説します．

まず，最初にパケットを検出します．その後，さらにパケット中のシンボルを検出します．そのタイミングに同期して信号を切り出しますが，タイミングの同期の際にPLCPプリアンブルのパケット/フレーム同期信号と相関をとります．こうして切り出したそれぞれのシンボルで使用するバンドに応じてダウン・コンバートして，ベースバンドに変換します．ディジタル・オシロスコープでは，20Gサンプル/sの速度でサンプリングを行いますが，実際のレシーバが行っているように528MHzのクロックでサンプリングし直します．こうして得られたシンボルをFFTすると，それぞれのサブキャリアに分離することができます．そのサブキャリアに対してイコライザで補正を行い，CPE（common phase error）を検出して位相補正を行います．この後，伝送速度に応じてQPSKもしくはDCMで復調を行います．この復調の際に得られたI/Q信号をもとにEVMを算出し，判定を行います（つまり，WiMedia AllianceのUWBパケットの構造に応じた動作をしなければならない）．

PLCPプリアンブルの前半の24シンボルは，すでに述べたようにTFCの値ごとに異なるパケット/フレーム同期信号です．この同期信号は一見ランダム・パターンのように見えます．しかし，データ・パターンがわかっているので，内部で作り出した同期パターンと相互相関をとり，もっとも相関の強いタイミングを検出することで正確なタイミングを知ることができます．次に，CEから得られた，送信機とメディアを含むチャネルの生の振幅および位相特性を用いて，これに続くPLCPヘッダとPSDUのイコライゼーションを行います．

● CPEの補正の方法が変わった

初期のコンプライアンス・テスト仕様では，シンボルごとにCPEを計算し，直接そのシンボルの位相補正を行っていました．このようにして位相補正を施したコンスタレーション・データからEVMを計算し，その結果を評価していました．しかし，このような計算法では，EVM評価の結果と相互接続性テストにおける結果との間に満足のいく相関が見られませんでした．

これは，シミュレーションで行う位相補正と実際のレシーバで行われている位相補正にかい離があると考えられました．実際のレシーバでは，検出したCPEをフィードバックして補正をかけるのは同じでも，フィードバックがかかる際にある一定の遅延が存在します．計算されたCPEをそのまま補正に使う方式では，この遅延をシミュレーション

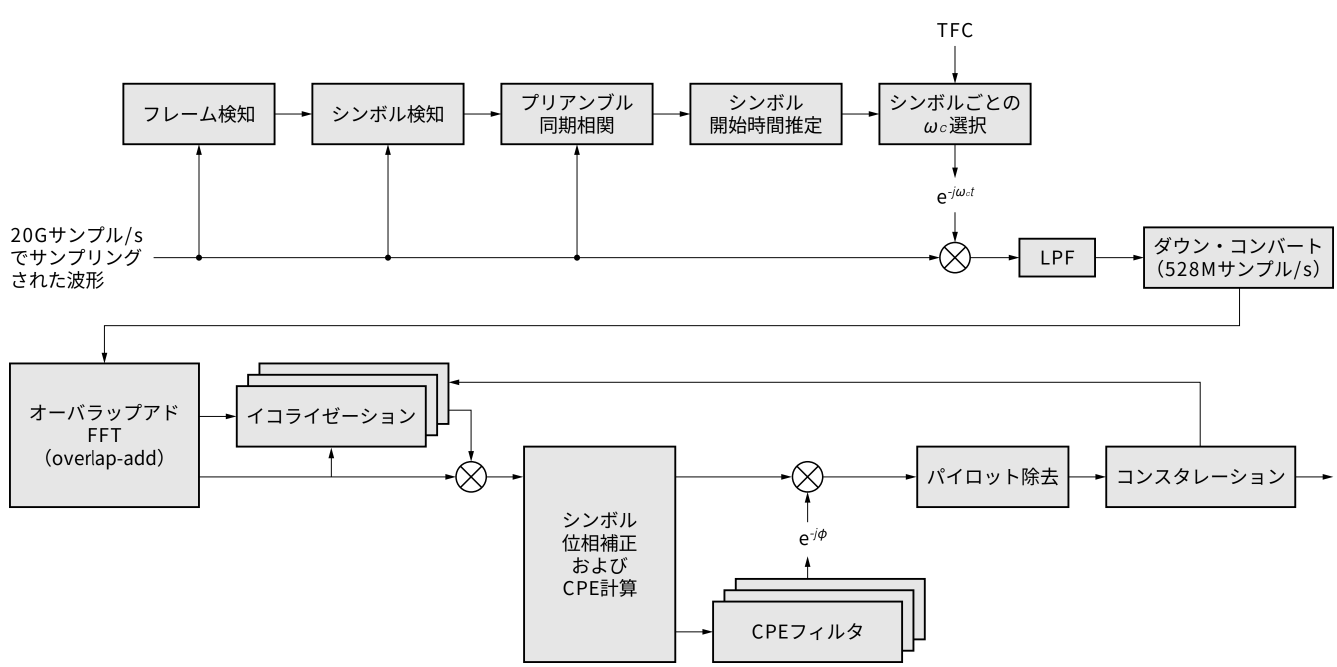


図21　レシーバのシミュレーション用ブロック図

できていなかったということなのです．この遅延をシミュレーションするためにフィルタの使用が義務づけられました．このフィルタの特性はテスト仕様では以下の式で規定されています．

$$H(z)=\frac{1+z^{-1}}{c_1+c_2z^{-1}} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで，c_1は$1+1/b$，c_2は$1-1/b$です．bは（$1-\cos\theta-3\mathrm{dB}$）/（$1+\cos\theta-3\mathrm{dB}$）の平方根です．ただし，θ－3dBは3dB減衰した点を表しています．このθ－3dBは，TFIモードとFFIモードで多少異なる値となります．**図21**のブロック図でもわかるとおり，計算されたCPEはいったんフィルタを通してから補正に用いることとなりました．

図22に，従来の方式であるシンボルごとにフィルタを通さず直接補正を行った場合のコンスタレーション表示を示します．**図19**（フィルタを介して位相補正を行う方法）では－14.31dBを示していたものですが，ここでは－20.56

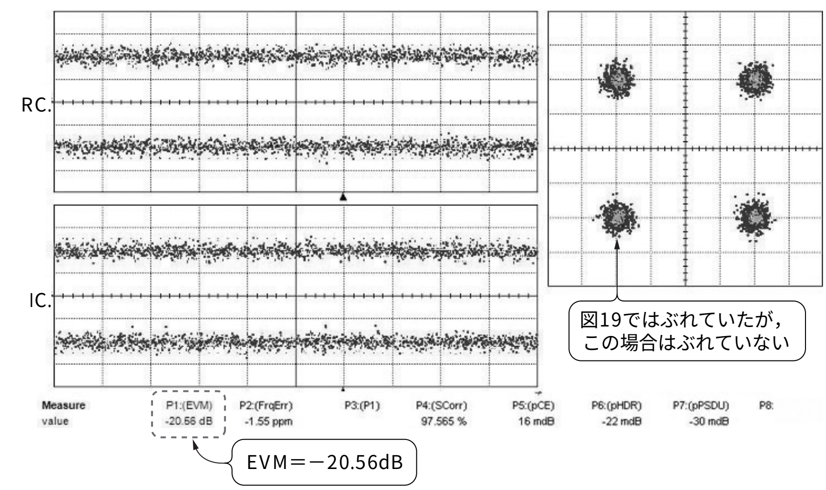


図22
QPSKのコンスタレーション（フィルタなし）
図19では回転ブレで低いEVM値しか示さなかった信号も，CPE補正にフィルタを入れないと回転ブレが現れず，－20.56dBと良好なEVM値を示す．

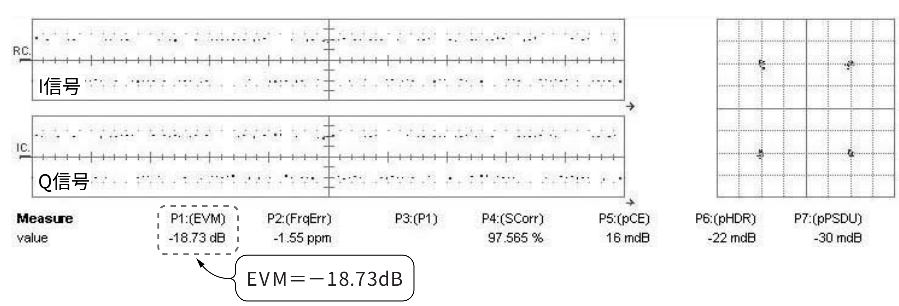


図23
最初のシンボルのコンスタレーション
PSDUの最初のシンボル（パケットの43番目のシンボル）で見たコンスタレーションは，正常に四つのステートが所定の位置で確認でき，EVMも－18.73dBと良好な値を示している．

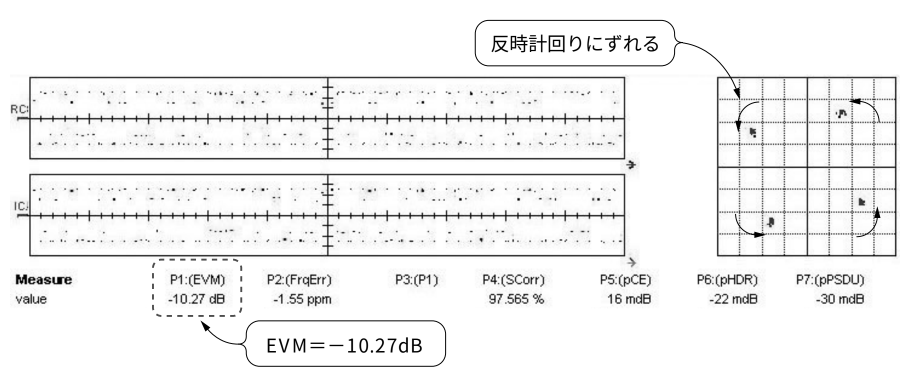


図24
7番目のコンスタレーション
PSDUの7番目のシンボル（パケットの49番目のシンボル）では，四つのステートが反時計周りに回転して位置がずれてしまっている．また，EVMも－10.27dBと低い値になっている．

dBと規格を満足しています．つまりシンボルごとに直接補正をかけた場合は，本来，相互接続性テストでは満足のいく結果が得られないICでも規格に適合しているように判定されてしまうということです．

● コンスタレーションを用いてEVM不良をデバッグ

EVM評価で不良となった場合，シンボルごとでコンスタレーションの配置がどのように変化しているかを確認すると，原因を探るためのヒントが得られます．

PSDUの最初のシンボルでは**図23**のように各ステートが正しく配置されており，EVMも−18.73dBと正常な値を示しています．しかし，7番目のパケットでは**図24**のように各ステートが回転してしまい，正常なステートの位置に存在しないことになります．EVMの値も−10.27dBと大きく下がってしまっています．この回転は18番目のパケットでは再び正しい位置に戻っていて，周期的に回転していることが確認できます．周期的に位相の回転が起きているということは，送信機側の発振子（LO：local oscillator）の位相ノイズの影響が原因であると推測されます．各シンボルにおけるCPEの変動を見ることで，より正確に状況を判断できます．

図25に，横軸をパケット信号と同じ時間軸，縦軸をPSDUのシンボルごとのCPEの値としてプロットしたものを示します．三つプロットされているのは3バンドに対応しているからです．縦軸は1目盛り当たり20 °になっています．かなり速い位相変動が60 °程度起きていることが，図から読み取れます．この図からも位相ノイズの影響が強く疑われます．事実，位相ノイズの小さなICの場合は，フィルタの有無によるEVMの差異はほとんど見られません．

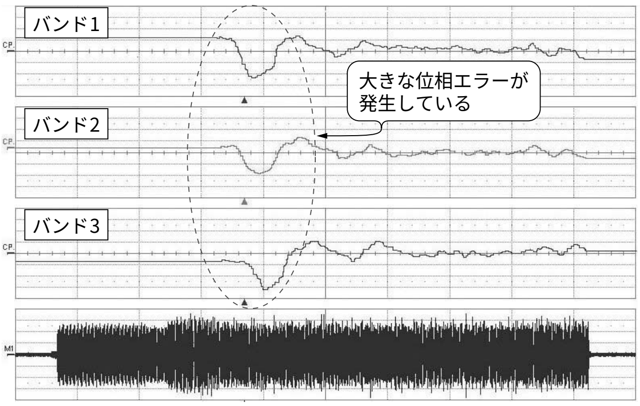


図25　CPE表示

CPEのプロットはバンドごとに行われ，PSDU部のみが対象となっている．PSDUが開始してすぐ大きなCPEエラーが発生していることがわかる．

参考・引用*文献

(1) * Ecma International；Standard ECMA-368 High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard 1st Edition，Dec. 2005.
(2) LeCroy Corporation；MB-OFDM UWB Software Option Operator's Manual.
(3) * Jeff Ravencraft；Certified Wireless USB from USB-IF，レクロイ・ジャパン主催第3回ワイヤレスUSB講演会資料，2006年4月5日.
(4) * Jeff Ravencraft；The Time is Now!，レクロイ・ジャパン主催第4回ワイヤレスUSB講演会資料，2006年7月21日.
(5) * James Write；Certified Wireless USB Protocol testing，レクロイ・ジャパン主催第3回ワイヤレスUSB講演会資料，2006年4月5日.
(6) * WiMedia Alliance；WiMedia PHY Compliance and Interoperability Test Specification Version 1.0，Sep. 2006.（同アライアンスのメンバのみに公開）
(7) WiMedia Alliance；MultiBand OFDM Physical Layer Specification Release 1.1，July 14，2005.（同アライアンスのメンバのみに公開）
(8) USB-IF；Wireless Universal Serial Bus Specification，May 12，2005.（http://www.usb.org/wusb/から入手可能）
(9) * 総務省のホームページ；http://www.soumu.go.jp/menu_04/s_hourei/new_hourei.html#shourei（電波法施行規則の一部を改正する省令，無線設備規則の一部を改正する省令，特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則の一部を改訂する省令）

つじ・よしき
レクロイ・ジャパン（株）

<筆者プロフィール>
辻嘉樹．1990年レクロイ・ジャパンに入社．プロダクト・マーケティング・マネージャとしてディジタル・オシロスコープを用いたソリューション展開を担当．

3